

## **ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ОТОЧУЮЧОГО СЕРЕДОВИЩА**

УДК (574+502.7)

**О. М. ГЕТМАНЕЦ\***, канд. физ.-мат. наук, доц.,  
**В. Г. ГОРДИЕНКО\*\***, д-р хим. наук, проф., **А. А. ДРОЗДОВ\***, ассист.,  
**Н. М. ПЕЛИХАТЫЙ\*\*\***, д-р физ.-мат. наук, проф.

*\*Харьковская государственная зооветеринарная академия*

*\*\*Харьковский национальный медицинский университет*

*\*\*\*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина*

### **РАДИАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ МЕСТНОСТИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ПРИ ПОМОЩИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДОЗИМЕТРА**

Предложена методика долговременного удаленного радиационного мониторинга местности при помощи волоконно-оптического дозиметра с дополнительным точечным датчиком радиации, которая позволяет быстро и надежно определять поле радиационного фона как внутри контролируемой зоны, так и вблизи ее границы, а также локализовать источники повышенной радиации.

**Ключевые слова:** волоконно-оптический дозиметр, мониторинг, реальное время.

**Гетманец О. М., Гордієнко В. Г., Дроздов О. О., Пеліхатий Н. М.**

### **РАДІАЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ МІСЦЕВОСТІ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ ЗА ДОПОМОГОЮ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ДОЗИМЕТРУ**

Запропонована методика тривалого віддаленого радіаційного моніторингу місцевості за допомогою волоконно-оптичного дозиметру з додатковим точковим датчиком радіації, яка дозволяє швидко і надійно визначати поле радіаційного фону як усередині контрольованої зони, так і поблизу її межі, а також локалізувати джерела підвищеної радіації.

**Ключові слова:** волоконно-оптичний дозиметр, моніторинг, реальний час.

**Getmanets O. M., Gordienko V. G., Drozdov A. A., Phelikhatiy N. M.**

### **RADIATION MONITORING OF LOCALITY IN REAL-TIME MODE BY FIBRE-OPTICAL DOSIMETER**

The method of duration remote radiation monitoring of locality by fibre-optical dosimeter with the additional point sensor of radiation, which allows quickly and reliably to determine the field of radiation background into the controlled area and near-by its border and also to localize the sources of the promoted radiation has been proposed.

**Key words:** fibre-optical dosimeter, monitoring, real time.

В настоящее время широко обсуждаются возможности использования распределенных волоконно-оптических дозиметров для решения задач долговременного удаленного радиационного мониторинга местности вблизи ядерных установок, на загрязненных территориях и в местах хранения радиационных отходов [1]. Волоконно-оптический дозиметр включает в себя радиационно-чувствительные оптические световоды, специальным образом размещенные на местности, радиационно-стойкие волоконные световоды, доставляющие световой сигнал к

удаленной регистрирующей аппаратуре, оптический рефлектометр и компьютер.

Под действием ионизирующего излучения в сетке стекла радиационно-чувствительного световода возникают центры окраски, из-за чего ослабевает световой сигнал, распространяющийся по световоду, при этом величина ослабления однозначно связана с поглощенной дозой. Рефлектометр строит распределение величины затухания светового сигнала вдоль радиационно-чувствительного световода, которое при помощи компьютера легко пересчитывается в продольное распределение поглощенной дозы в стекле световода и, соответственно, в мощность экспозиционной дозы. Преимуществом

щества данного метода удаленного радиационного мониторинга состоят в относительно невысокой стоимости аппаратуры, надежности системы и ее информативности. При этом существующие стандартные дозиметры и датчики имеют принципиальные ограничения для решения задач долговременного удаленного мониторинга радиационного поля: они требуют электропитания и систем передачи электрического сигнала, что ставит под вопрос их надежность в аварийных условиях; они также являются точечными датчиками, и поэтому контроль обширной территории является труднореализуемым.

В то же время волоконно-оптический дозиметр определяет величину поглощенной дозы лишь вдоль длины световода – границы контролируемой зоны и ничего не говорит о поле радиационного фона внутри самой зоны и в ее окрестности. Поэтому целью настоящей работы является исследование возможностей применения волоконно-оптического дозиметра для радиационного мониторинга местности внутри контролируемой территории и вблизи ее границы. Как будет показано ниже, для решения поставленной задачи наряду с измерением непрерывного распределения мощности экспозиционной дозы вдоль световода волоконно-оптического дозиметра необходимо произвести хотя бы одно измерение мощности дозы в центре контролируемой зоны при помощи точечного датчика. На основании этих данных непрерывно строится нелинейная регрессионная модель, которая и описывает поле радиационного фона как внутри, так и вблизи границы контролируемой зоны.

Предположим, что некоторую контролируемую территорию окружает волоконно-оптический дозиметр, имеющий общую длину  $L$ . Световой сигнал от чувствительного волоконного световода доставляется до отдаленной регистрирующей аппаратуры, обрабатывается и пересчитывается в распределение мощности экспозиционной дозы  $z$  ионизирующего излучения вдоль текущей длины дозиметра  $l$ :  $z = z(l)$   $0 \leq l \leq L$ . Пусть в центре контролируемой зоны находится точечный дозиметр (он может быть также волоконно-оптическим [2]), показания которого  $z_0$  тоже доставляются к отдаленной регистрирующей аппаратуре. Для определенности координаты дозиметра примем

за начало отсчета прямоугольной системы координат, т.е.  $x = 0$ ,  $y = 0$ . Значение поля излучения в этой точке равно  $z(0;0) = z_0$ . Ось  $0x$  будем считать направленной с запада на восток, а ось  $0y$  – с юга на север. Поскольку волоконно-оптический дозиметр расположен на местности вполне определенным образом, то зависимости координат произвольной точки дозиметра от его текущей длины  $l$  считаются известными, т.е.  $x = x(l)$ ,  $y = y(l)$ .

Основываясь на показаниях волоконно-оптического и точечного дозиметров, будем строить модель нелинейной регрессии для мощности экспозиционной дозы ионизирующего излучения  $z$  внутри контролируемой зоны и вблизи ее границы:  $z = z(x; y)$ . Для начала рассмотрим модель 2-го порядка по переменным  $x$  и  $y$  – координатам произвольной точки зоны (хотя, в принципе, на основании показаний дозиметров можно строить модель любого порядка):

$$z = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f. \quad (1)$$

где  $a, b, c, d, e, f$  – параметры регрессии, оценки которых можно определить по фактическим показаниям детекторов методом наименьших квадратов. Заметим, что параметр  $f = z(0;0) = z_0$ . При этом в системе нормальных уравнений для оценок параметров  $a, b, c, d, e$  суммы по всем точкам световода волоконно-оптического дозиметра переходят в интегральные суммы, а их пределы – в соответствующие контурные интегралы вдоль длины световода. Запишем эту систему в матричном виде:

$$A \cdot x = b, \quad (2)$$

где матрица системы

$$A = \begin{pmatrix} \overline{x^4} & \overline{x^2 y^2} & \overline{x^3 y} & \overline{x^3} & \overline{x^2 y} \\ \overline{x^2 y^2} & \overline{y^4} & \overline{xy^3} & \overline{xy^2} & \overline{y^3} \\ \overline{x^3 y} & \overline{xy^3} & \overline{x^2 y^2} & \overline{x^2 y} & \overline{xy^2} \\ \overline{x^3} & \overline{xy^2} & \overline{x^2 y} & \overline{x^2} & \overline{xy} \\ \overline{x^2 y} & \overline{y^3} & \overline{xy^2} & \overline{xy} & \overline{y^2} \end{pmatrix},$$

а вектор решений  $x = \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \end{pmatrix}$ , и вектор

правой части  $b = \begin{pmatrix} \overline{zx^2} - z_0 \overline{x^2} \\ \overline{zy^2} - z_0 \overline{y^2} \\ \overline{zxy} - z_0 \overline{xy} \\ \overline{zx} - z_0 \overline{x} \\ \overline{zy} - z_0 \overline{y} \end{pmatrix}$ .

Здесь введены обозначения:

$$\begin{aligned} \overline{x^4} &= \frac{1}{L} \oint_L x^4 dl, & \overline{x^2 y^2} &= \frac{1}{L} \oint_L x^2 y^2 dl, \\ \overline{x^3 y} &= \frac{1}{L} \oint_L x^3 y dl, & \overline{xy^3} &= \frac{1}{L} \oint_L xy^3 dl, \\ \overline{x^3 y} &= \frac{1}{L} \oint_L x^3 y dl, & \overline{y^4} &= \frac{1}{L} \oint_L y^4 dl, \\ \overline{x^3} &= \frac{1}{L} \oint_L x^3 dl, & \overline{y^3} &= \frac{1}{L} \oint_L y^3 dl, \\ \overline{x^2} &= \frac{1}{L} \oint_L x^2 dl, & \overline{y^2} &= \frac{1}{L} \oint_L y^2 dl, \\ \overline{x^2 y} &= \frac{1}{L} \oint_L x^2 y dl, & \overline{xy^2} &= \frac{1}{L} \oint_L xy^2 dl, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \overline{x} &= \frac{1}{L} \oint_L x dl, & \overline{y} &= \frac{1}{L} \oint_L y dl \\ \overline{xy} &= \frac{1}{L} \oint_L xy dl, & \overline{zx^2} &= \frac{1}{L} \oint_L zx^2 dl, \\ \overline{zy^2} &= \frac{1}{L} \oint_L zy^2 dl, & \overline{zxy} &= \frac{1}{L} \oint_L zxy dl, \\ \overline{zx} &= \frac{1}{L} \oint_L zx dl, & \overline{zy} &= \frac{1}{L} \oint_L zy dl. \end{aligned}$$

Поскольку зависимости  $z(l), x(l), y(l)$  известны, то вычисление контурных интегралов вдоль длины световода  $L$  не представляет трудностей. Например, если волоконно-оптический дозиметр представляет собой окружность радиуса  $R$ , то матрица системы принимает вид:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{3 R^4 \pi}{4} & \frac{R^4 \pi}{4} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{R^4 \pi}{4} & \frac{3 R^4 \pi}{4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R^4 \pi}{4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R^2 \pi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R^2 \pi \end{bmatrix} \quad (3)$$

При этом  $\overline{x} = 0$ ,  $\overline{y} = 0$ ,  $\overline{xy} = \overline{yx} = 0$ .

В качестве примера рассмотрим случай, когда некоторую контролируемую зону окружает волоконно-оптический дозиметр, представляющий собой окружность радиуса  $R = 1$  км, имеющий начало и конец в точке с координатами  $(1; 0)$  (в километрах). В центре окружности расположен точечный дозиметр. Пусть в некоторый определенный момент времени распределение мощности экспозиционной дозы вдоль длины световода имеет вид, приведенный на рисунке 1, а показания точечного дозиметра в центре зоны составляют  $z_0 = 10$  мкР/час.

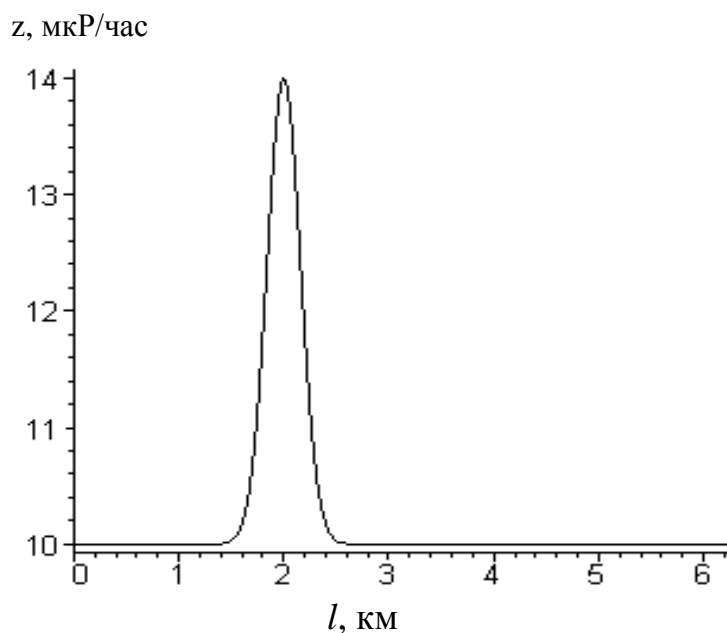


Рис. 1 – Распределение мощности дозы вдоль длины световода

Тогда система нормальных уравнений для определения оценок параметров нелинейной регрессии (1) принимает вид:

$$\begin{bmatrix} \frac{3\pi}{4} & \frac{\pi}{4} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\pi}{4} & \frac{3\pi}{4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\pi}{4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,30 \\ 1,29 \\ -0,57 \\ -0,65 \\ 1,42 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Решая данную систему, получаем следующее уравнение регрессии:

$$z = -0,06x^2 + 0,57y^2 - 0,73xy - 0,21x + 0,45y + 10 \quad (5)$$

Здесь координаты  $x$  и  $y$  выражены в километрах.

На рисунке 2 представлено распределение радиационного фона, полученное на основании уравнения (5). Фон изменяется в зависимости от тона (белый – 8 мкР/час, черный – 16 мкР/час через 1 мкР/час).

Из этого рисунка видно, что источник ионизирующего излучения находится вне контролируемой зоны на северо-западе.

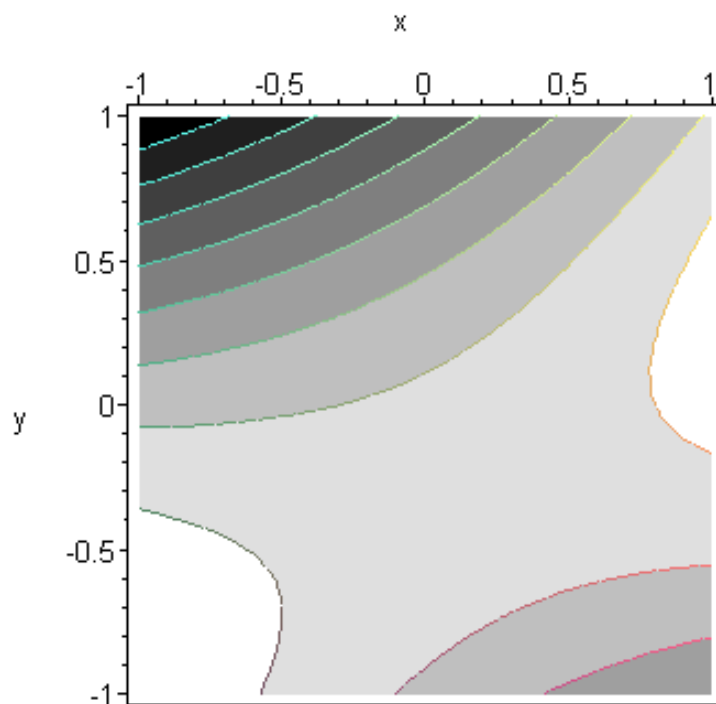
В качестве второго примера рассмотрим случай, когда распределение мощности дозы вдоль длины световода имеет тот же вид (рис. 1), а значение мощности дозы в центре зоны составило:  $z_0 = 16$  мкР/час. При этом система нормальных уравнений для определения параметров регрессии (1) принимает следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \frac{3\pi}{4} & \frac{\pi}{4} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\pi}{4} & \frac{3\pi}{4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\pi}{4} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -18,55 \\ -17,56 \\ -0,57 \\ -0,65 \\ 1,42 \end{pmatrix} \quad (6)$$

На основании ее решения получим следующее уравнение регрессии:

$$z = -6,06x^2 - 5,43y^2 - 0,73xy - 0,21x + 0,45y + 16 \quad (7)$$

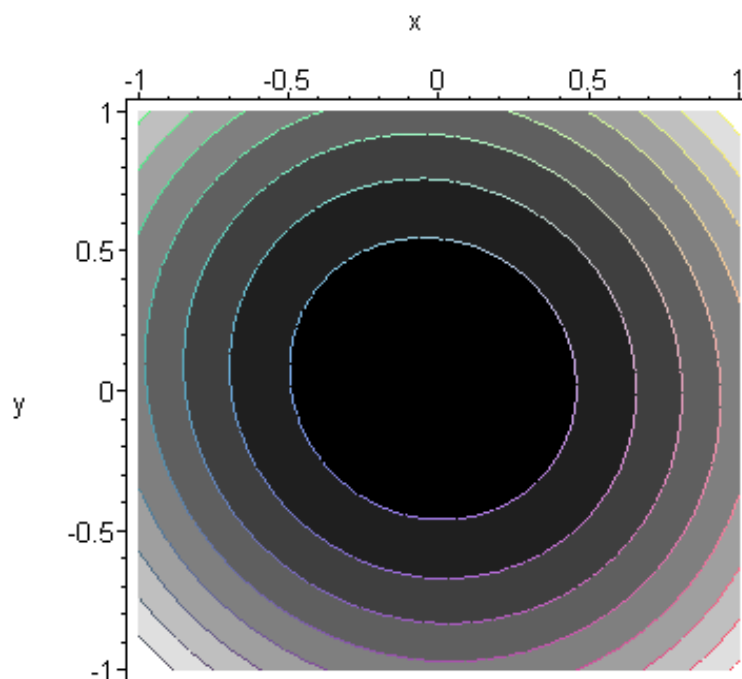
Здесь координаты  $x$  и  $y$  выражены также в километрах.



**Рис. 2** – Поле радиационного фона

На рисунке 3 представлено распределение радиационного фона, предсказываемое уравнением (7). Фон изменяется в зависимо-

сти от тона (белый – 8 мкР/час, черный – 16 мкР/час через 1 мкР/час).



**Рис. 3** – Поле радиационного фона

Из этого рисунка видно, что источник излучения находится внутри зоны.

Таким образом, два рассмотренных выше примера показывают, что продольное распределение поглощенной дозы в стекле световода не определяет однозначно поле ионизирующего излучения как внутри контролируемой зоны, так и за ее пределами. Для устранения неоднозначностей следует проводить дополнительное измерение мощности дозы внутри зоны.

**Выводы.** Предлагаемая методика длительного удаленного радиационного мониторинга протяженной местности при помощи волоконно-оптического дозиметра с дополнительным точечным датчиком радиации позволяет быстро и надежно определять поле радиационного фона как внутри контролируемой зоны, так и вблизи ее границы, а также локализовать источники повышенной радиации. Ее преимуществами являются

относительно невысокая стоимость, надежность, информативность, возможности интеграции с Интернетом и системами спутниковой связи. Повышение точности методики может быть достигнуто за счет использования нелинейных регрессионных моделей более высокого порядка по координатам.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Разработка волоконных световодов для применения при повышенном уровне радиации / Томашук А. Л., Голант К. М., Забейайлов М. О. // Волоконно-оптические технологии, материалы и устройства. – М. – 2001. – № 4. – С. 52 – 65.
2. Волоконно-оптический монитор-дозиметр импульсного ионизирующего излучения / Родигин А. В., Эльяш С. Л., Пикарь В. А., Гончарова В. Ф. // ВАНТ. – Х. – 2010. – Вып. 2. – С. 8 – 9.

Надійшла до редколегії 14.12.2010